

大体积混凝土防裂智能监控系统

张国新,李松辉,刘毅,张磊

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为达到混凝土温控防裂的目的,并提高施工质量,研究开发了大体积混凝土防裂智能监控系统。该系统由感知、互联、分析决策和控制 4 个部分组成,可以实现原材料预冷、混凝土拌和、运输、入仓、平仓、振捣、通水冷却、表面养护全过程温控信息的自动感知、传输、互联、共享环节的智能控制,实现了基于互联网、物联网技术的温控防裂全要素、全过程管理。实际工程应用表明,该智能监控系统可实现现场温控实施情况的自动获取、准确掌握、实时评估、智能干预及决策支持,能有效提高混凝土施工的管理水平,防止裂缝的发生。

关键词:大体积混凝土;温度控制;防裂;智能监控

中图分类号:TV528

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)05-0083-06

Intelligent monitoring and control system for crack prevention of mass concrete//ZHANG Guoxin, LI Songhui, LIU Yi, ZHANG Lei(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: In order to prevent cracks and improve the construction quality of mass concrete, an intelligent monitoring and control system for crack prevention of mass concrete was developed. The system is composed of four parts, including those relating to perception, interconnection, analysis and decision making, and control, and can realize automatic perception, transmission, interconnection, and sharing of temperature control information throughout the processes of raw material precooling, concrete mixing, transportation, placement, spreading, and vibration, water cooling, and concrete surface maintenance, as well as partly intelligent control of these processes. The system has also realized management of all factors and the entire process of temperature control and crack prevention based on network technologies and the internet of things. Applications show that the system can help improve the management level and prevent cracks during concrete construction through automatic acquisition of information, accurate control, real-time evaluation, intelligent intervention, and decision making support during the implementation of field temperature control.

Key words: mass concrete; temperature control; crack prevention; intelligent monitoring and control

我国已建成了二滩、小湾、拉西瓦、构皮滩、龙滩、光照、锦屏一级、溪洛渡等一批特高混凝土坝,白鹤滩、乌东德、马吉等特高拱坝近期也陆续开工,这些高坝的建成将对缓解我国电力资源紧张、解决水资源短缺问题发挥重要作用,将取得显著的社会和经济效益^[1-2]。

裂缝控制一直是大体积混凝土施工的难点之一。温控防裂的理论研究与工程实践,最早始自 20 世纪 30 年代,经过数十年的发展,已逐步建立了一整套相对完善的温控防裂理论体系^[3],形成了较为系统的混凝土温控防裂措施,包括分缝分块、降低浇筑温度、通水冷却、表面保温等,但“无坝不裂”仍然

是一个客观现实^[3-5]。混凝土裂缝产生的原因复杂,有结构、材料、施工等方面的原因,其中一个重要原因是信息获取的“四不”(不及时、不准确、不真实、不系统)导致的温控措施与温控管理不到位。同时,由于人为的控制方式,施工质量受现场工作人员个人素质的影响较大,产生与设计状态相比较大的偏差,导致温差大、降温幅度大、降温速率大、温度梯度大这“四大”温控施工问题,最终导致混凝土裂缝的产生。

针对特高拱坝温控防裂出现的问题,朱伯芳院士提出了数字水电站的概念,即水电站规划、设计、科研、建设及管理的最优化、可视化和网络化,开发出国内第一个数字化温控系统——混凝土温度与应

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB035904,2013CB036406);国家自然科学基金(51579252)

作者简介:张国新(1960—),男,山东临朐人,教授级高级工程师,主要从事大体积混凝土温控防裂及复杂结构多场非线性仿真分析研究。

E-mail:zhanggx@iwhr.com

力控制决策支持系统,并在周公宅工程中获得应用。该系统可在大坝施工过程中根据实际施工条件和温控措施对大坝进行全过程仿真分析,及时了解坝体各坝块的温度与应力状态以及各种温控措施的实际效果,并可预报竣工后运行期的温度和应力状态^[6]。2007年朱伯芳院士又提出“数字监控”的概念^[6-7],将传统的仪器监测与工程施工期、初次蓄水期乃至运行期全过程数字仿真分析相结合,实现对大坝温度、变形、应力等关键要素的全过程全场实时监控,有效地克服了仪器监测“空间上离散”、“时间上断续”的不足。2009年“数字监控”技术在锦屏一级及溪洛渡工程中应用,运用该技术可以实时开展大坝工作性态评估,同时为施工期动态设计提供决策支持^[8-9]。

钟登华院士、马洪琪院士将信息化与数字化相结合,提出了“数字大坝”^[10-12]的理念,并在糯扎渡工程获得应用,该系统基于GPS、GPRS和PDA技术,实现了碾压遍数、碾压轨迹、行车速度、激振力、压实厚度等碾压参数的全过程、精细化、在线实时监控,为高心墙堆石坝建设的质量控制提供了一条新的途径,并可以推广至碾压混凝土坝。

以信息化、数字化为基础,结合人工智能、自动化等技术,便可实现施工过程中若干工序的智能化^[13-15]。在水利工程领域,张国新等^[13]提出了“数字大坝”朝“智能大坝”转变的设想,指出可将智能化技术应用于降低浇筑温度、控制仓面温度、通水冷却、混凝土养护等各个环节。李庆斌^[14]就智能大坝进行了详细论述,提出了基于物联网、自动测控和云计算技术实现个性化管理与分析,并实施对大坝性能进行控制的构想,指出智能大坝是在对传统混凝土大坝实现数字化后,采用通信与控制技术对大坝全生命周期实现所有信息的实时感知、自动分析与性能控制的大坝。谭恺炎等^[16]针对大体积混凝土冷却通水系统进行了相关的研究和实践。

信息化、数字化、数值模拟仿真、大数据等技术的迅速发展为大坝温控防裂的智能化提供了机遇。笔者针对大体积混凝土温控施工及数字监控存在的问题,提出了“九三一”温度控制模式^[2],即九字方针(早保护、小温差、慢冷却)、三期冷却(一期冷却、中期冷却和二期冷却)和一个监控(智能监控)。通过“九三一”温度控制模式,配合智能化控制可有效解决“四大”温控施工问题,从根本上达到混凝土温控防裂的目的。

1 智能监控系统的构成

智能监控系统的构成同人工智能类似,包括感

知、互联、分析决策和控制4个部分。感知部分主要是对各关键要素的采集(自动采集、人工采集和信息传输)。互联是通过信息化的手段实现多层次网络的通信,实现远程、异构的各种终端设备和软硬件资源的密切关联、互通和共享。控制包括人工干预和智能控制两部分,其中,人工干预主要是在智能分析、判断、决策的基础上形成报警、预警及反馈多种方案和措施的指令,根据指令进行人为干预;智能控制主要是自动化及智能化的温度、湿度、风速等小环境指标控制以及混凝土养护和通水冷却调控。分析决策部分是整个系统的核心,通过学习、记忆、分析、判断、反演、预测等手段,最终形成决策。感知、互联和控制相辅相成,相互依存,以分析决策为核心形成智能监控的有机整体,如图1所示。

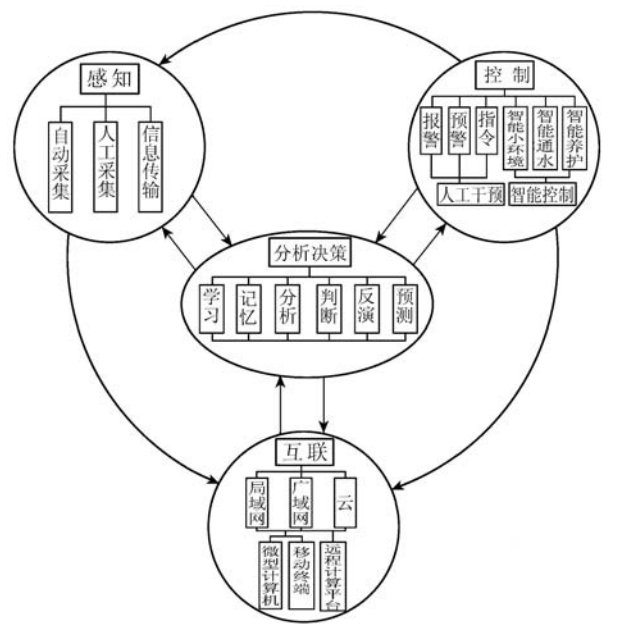


图1 智能监控系统的构成

智能监控系统包含了“监”和“控”2个层次,“监”是通过感知、互联功能对影响温度控制、防裂的施工各环节信息进行全面的检测、监测和把握;“控”则是对混凝土施工过程中影响温度的因素进行智能控制或人工干预。图2为整个混凝土防裂智能监控系统现场构成示意图,在拌和楼、浇筑仓面、通水冷却仓、混凝土表面等部位布置传感器,根据需要在坝区设置分控站,用以搜集相关信息并发出控制指令,对各环节中可能自动控制的变量如通水流量、仓面气温、湿度、仓面喷淋时间、喷淋强度等进行智能控制,各分控站通过无线传输的方式实现与总控室的信息交换,构成完整的监控系统。

1.1 感知部分

感知即实时采集施工各个环节的信息。在拌和楼、机口、仓面等温控场所均可布置数字式测温设

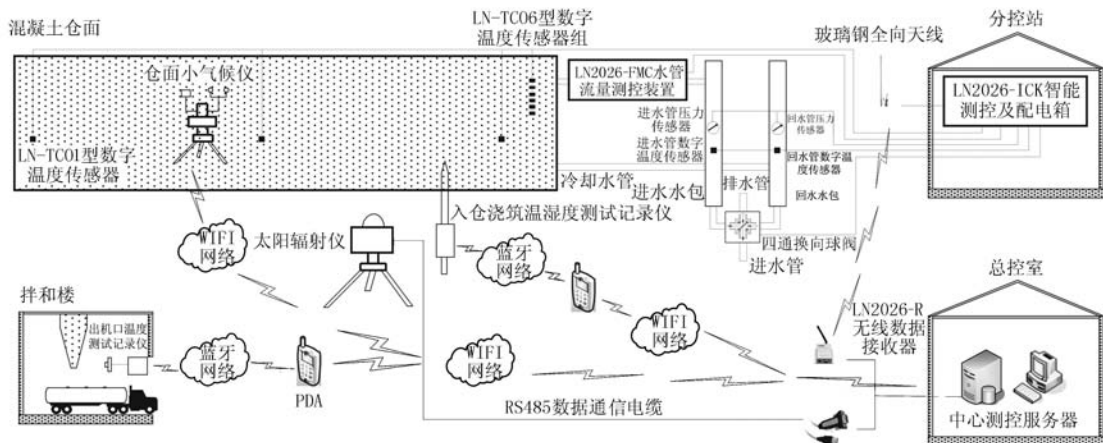


图2 混凝土防裂智能监控系统现场构成示意图

备,如数字温度计(包括固定式、手持式)和红外温度计等。通过分析,总结出22个需要实时感知的观测量(即太阳辐射、气温信息、仓面温度、骨料温度、机口温度、入仓温度、浇筑温度、内部温度、进口水温、出口水温、通水流量、水管压差、温度梯度、水流方向、最高温度、一冷温度、中冷温度、二冷温度、内外温差、基础温差、上下层温差、降温速率)用于监控施工各环节影响温控的因素及混凝土的状态,大多数观测量可用固定式仪器自动观测,少数观测量如机口温度、入仓温度、浇筑温度采用手持式数字温度计进行半自动化观测。

针对温控全要素全过程感知指标,研发了成套的智能感知设备,如数字温度计,温度梯度仪,仓面小气候仪,骨料红外测温装置,机口、入仓、浇筑温度测试仪等。开发的仓面小气候仪可同时监测温度、湿度、风速和风向,用于实时监控仓面环境,通水冷却环节除需要观测冷却水温 and 混凝土温度外,还要观测进出口水压、流向、流量等。还有一些影响温度控制的因素不能直接用仪器自动感知,需要人工采集数据录入,如浇筑仓的几何信息、位置、开仓时间、收仓时间等。部分信息以设计数据的方式在系统内建模,部分需要随施工进度逐点输入。

1.2 互联部分

互联是通过信息化手段,通过研发相关设备,设置分控站及总控室,使各施工设备之间、测温设备之间、测温设备与分控站之间、分控站与总控室之间建立实时通信,实现混凝土自原材料、混凝土拌和、混凝土仓面控制、混凝土内部生命周期内各种温控数据的实时采集、共享、分析、控制及反馈(互联结构如图3所示)。

实现互联的设备主要包括传感器、控制器、移动终端、施工设备、通水设备、固定终端、展示设备等。互联所采用的技术手段主要包括云互联、蓝牙、RS

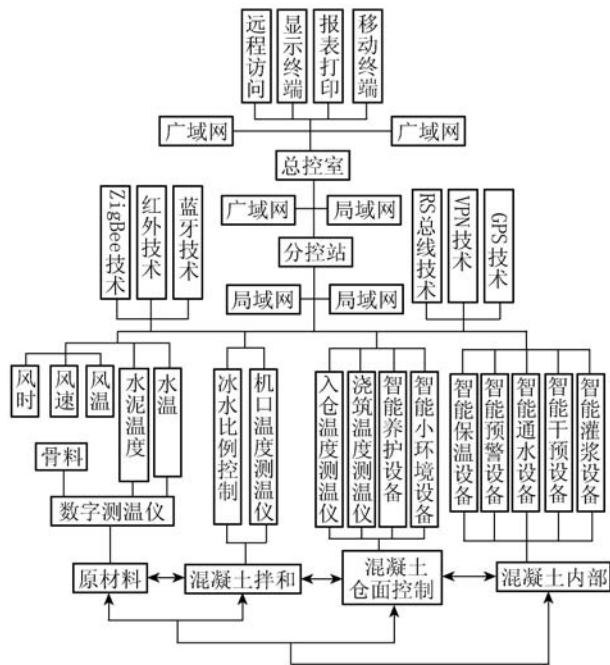


图3 大体积混凝土防裂智能监控系统互联结构

总线、ZigBee、WIFI、GPS等。设备与分控站或总控室之间的互联主要通过局域网的方式实现,分控站与总控室可通过局域网或广域网的方式实现,最后通过公共广域网实现数据库的远程访问。

图4为入仓浇筑温度测量数据互联结构,入仓、浇筑温度测试仪通过蓝牙与移动终端连接并通过GPS进行自动定位,移动终端通过WIFI网络与分控站或总控室服务器连接,测量的温度、湿度可通过该

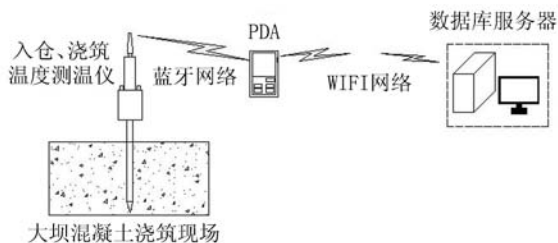


图4 入仓、浇筑温度测量数据互联结构

种互联方式实时自动传输至数据库,最后通过远程方式实现数据库的远程访问。

1.3 分析决策部分

分析决策是整个智能监控系统的核心,直接或间接获取的感知量,通过学习、记忆、分析、判断、反演、预测等,最终形成决策信息。系统中主要包括SAPTIS(simulation analysis program for temperature and stress)仿真分析模型、理想温度过程线模型、温度和流量预测预报模型、温控效果评价模型、表面保温预测模型、开裂风险预测预警模型这6个模型,通过这6个模型可以对混凝土当前温度控制状态进行评价及预测。

a. SAPTIS 仿真分析模型^[17]是笔者团队历经30年开发的一个混凝土结构全过程、多场耦合仿真分析模型。该模型的特点可以概括为“9321”,“9”是指可以模拟的9个过程:气象变化过程、基岩开挖过程、回填支护过程、浇筑硬化过程、温度控制过程、灌浆锚固过程、时效变形过程、蓄水渗透过程和长期运行过程;“3”是指水-热-力三场耦合;“2”是2个非线性,即弹塑性非线性和损伤非线性;“1”是1个迭代,即各种缝的开闭迭代。采用该模型可以模拟工程自基础开挖到建设、运行全过程各环节的温度场、渗流场及应力场,及时对大坝整体和局部的工作状态进行数值评估^[17]。

b. 理想温度过程线模型是指在一定的温控标准下,考虑不同坝型特点和不同坝体分区,按照温度应力最小的原则,从温差分级、降温速率、空间梯度控制等因素考虑,针对不同的工程、不同的混凝土分区甚至不同仓混凝土制定的个性化温度控制曲线。

c. 温度和流量预测预报模型可以预测未来温度变化,给出通水控制参数。该模型考虑了内部发热、表面散热、相邻块传热、通水带热等因素的影响,同时利用监测数据进行自学习和自修正,该模型计算公式如下:

$$T_{i+1} = T_i + \Delta\theta_i + \alpha_1 \bar{T}_a + \alpha_2 \bar{T}_b + \frac{1}{2} \alpha_3 (q_i + q_{i+1}) \tag{1}$$

式中: T_{i+1} 为*i*+1时刻的温度; T_i 为*i*时刻的温度; $\Delta\theta_i$ 为绝热温升; α_1 为表面散热系数; $\bar{T}_a$ 为表面温度; α_2 为相邻块散热系数; $\bar{T}_b$ 为相邻块温度; α_3 为通水散热系数, $\alpha_3 = f(L, T_w, a)$,其中*L*为管长, T_w 为水温,*a*为管径; q_i 和 q_{i+1} 分别为*i*时刻及*i*+1时刻的流量。

d. 温控效果评价模型。该模型通过设计的8张表格和12张图形可以直观、实时、全面地定量评价温控措施施工质量。

e. 表面保温预测模型。该模型根据大坝每日实际浇筑情况实时搜索暴露面,考虑天气预报、实测气温、混凝土内部温度等信息,通过应力仿真计算暴露面长周期应力及短周期应力,并对两者进行叠加,根据应力分析结果及实际采用的保温材料参数特性,给出是否需要保温及保温层厚度的建议。

f. 开裂风险预测预警模型。该模型通过对大坝浇筑到运行全过程的实时跟踪反演仿真分析,及时预测未来温度、应力及开裂风险,实时提出预警并给出建议。

1.4 控制部分

控制包括人工干预和智能控制两部分,主要包括5个子系统(图5)。其中,预警发布及干预反馈子系统和现场决策支持子系统需要人工干预。预警发布及干预反馈子系统是根据现场实时获取的监测数据通过分析决策模块进行自动计算,对超标量进行自动报警或预警,并将报警或预警信息自动发送至施工人员的终端设备上,施工人员根据报警或预警信息进行人工干预。现场决策支持子系统是通过温控周报、月报、季报、阶段性报告以及现场培训等方式实现温控施工的阶段性总结。

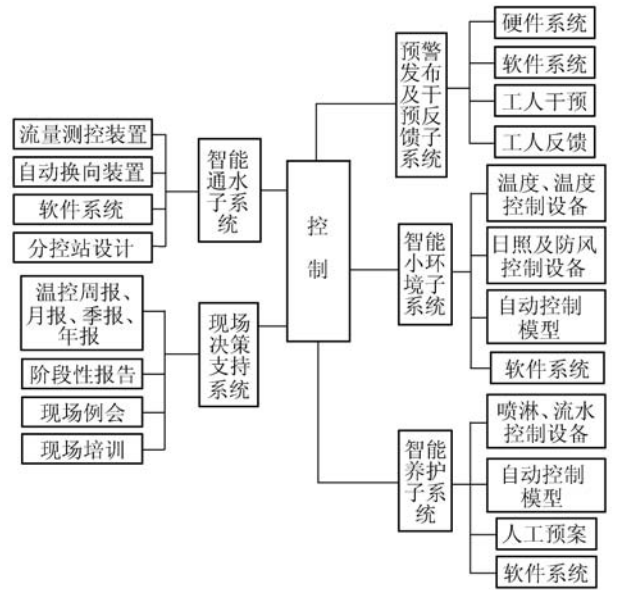


图5 控制部分结构示意图

智能控制主要包括智能通水子系统、智能小环境子系统、智能养护子系统。智能通水子系统主要是按照理想化温控曲线的要求,基于统一的信息平台和实测数据,运用经过率定和验证的预测分析模型,通过自动控制设备对通水流向、流量、水温进行自动控制。智能小环境子系统根据现场实时监测的温度、湿度,自动控制仓内小环境设备(如喷雾机),使仓面小环境满足现场混凝土浇筑要求。智能养护子系统是根据实时监测的混凝土内部温度、表面温

度等信息自动控制流水养护、花管养护等设备。

2 工程应用

自 2009 年起大体积混凝土防裂智能监控系统部分功能已在锦屏一级、溪洛渡、鲁地拉、藏木等工程中获得成功应用。采用该智能监控系统后,锦屏一级拱坝未发现温度裂缝,鲁地拉重力坝监控坝段裂缝明显少于未监控坝段,藏木重力坝监控坝段未发现裂缝。目前,该系统正在丰满及黄登工程中全面运用。

图 6 为藏木工程智能通水结果,图中包含了实测流量、预测流量、实测温度、目标温度和预测温度等 5 个感知量,由图 6 可知,实测温度与目标温度和预测温度基本一致。图 7 为该系统针对锦屏一级拱坝基础约束区固结灌浆“一进一出”和“三进三出”工况提供的长、短周期应力叠加计算结果,由图 7 可知“三进三出”保温方案是最优方案。

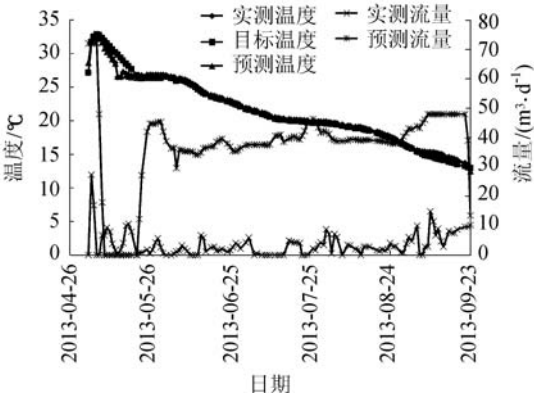


图 6 藏木工程智能通水结果

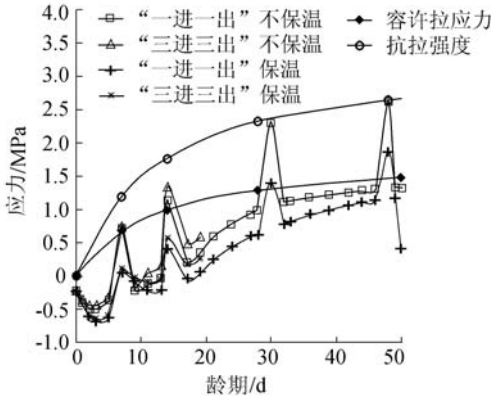


图 7 锦屏一级拱坝基础约束区长、短周期应力叠加计算结果

3 结 语

信息化、数字化、智能化技术的发展为温控防裂的智能化创造了条件,在混凝土温度控制的各个环节(包括原材料预冷、混凝土拌和、运输、入仓、平仓、振捣、通水冷却、表面养护等),利用数字化技

术、互联技术和自动控制技术,可有效避免传统施工方式带来的偏差和人为因素带来的不确定性。基于数字化技术的感知技术可以实时、准确地获取各个环节的有效信息(如温度、流量、风速、压力等);基于局域网和广域网的互联技术可以将施工现场的感知仪器、施工机械、控制设备、移动终端、固定终端等进行互联互通与数据共享,实现随时随地的有线、无线、远程及近程访问,通过材料预冷、拌和、仓面小环境、冷却通水的智能化控制可以做到温控多环节全程高精度控制。

智能监控的核心是分析与决策,利用确定性仿真分析方法和统计分析模型,以应力最优、措施合理可行为目标,动态确定每仓混凝土的冷却曲线,在此基础上调整各环节的温控参数,通过预测目标温度和实测目标温度的反复比较,不断调整温控参数,使最高温度、温差、温度变化速率达到最优,从而达到防裂的目的。

目前大体积混凝土防裂智能监控系统已在锦屏一级、溪洛渡、鲁地拉、藏木等工程中成功应用,取得良好的效果。应用实践表明,分析决策部分的几个温控模型是技术关键,应用于具体工程时各模型还有待不断改进、优化。

参考文献:

[1] 中国水力发电工程学会. 中国水力发电年鉴:2013 [M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[2] 张国新,刘毅,李松辉,等. “九三一”温度控制模式的研究与实践[J]. 水力发电学报,2014,33(2): 179-184. (ZHANG Guoxin, LIU Yi, LI Songhui, et al. Research and practice of Nine-Three-One temperature control mode [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 179-184. (in Chinese))

[3] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[4] 刘毅,张国新. 混凝土坝温控防裂要点探讨[J]. 水利水电技术,2014,45(1): 77-89. (LIU Yi, ZHANG Guoxin. Discussion on key points of temperature control and crack prevention dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(1): 77-89. (in Chinese))

[5] 朱伯芳,张国新,许平,等. 混凝土高坝施工期温度与应力控制决策支持系统[J]. 水利学报,2008,39(1): 1-6. (ZHU Bofang, ZHANG Guoxin, XU Ping, et al. Decision making support system for temperature and stress control of high concrete dams in construction period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 1-6. (in Chinese))

[6] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008,39(2): 15-18. (ZHU Bofang. Numerical monitoring

- of concrete dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(2): 15-18. (in Chinese))
- [7] 朱伯芳, 张国新, 贾金生, 等. 混凝土坝的数字监控: 提高大坝监控水平的新途径[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 130-136. (ZHU Bofang, ZHANG Guoxin, JIA Jinsheng, et al. Numerical monitoring of concrete dams: a new way for improving the safety control of concrete dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 130-136. (in Chinese))
- [8] 刘毅, 张国新, 王继敏, 等. 特高拱坝施工期数字监控方法、系统与工程应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 33-37. (LIU Yi, ZHANG Guoxin, WANG Jimin, et al. Numerical monitoring methods and system for construction of super high arch dam and its engineering practice [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 33-37. (in Chinese))
- [9] 张国新, 张磊, 刘毅, 等. 锦屏一级拱坝施工期工作性态反演仿真分析[C]//陈云华. 流域水电开发重大技术问题及主要进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2014: 225-231.
- [10] 马洪琪, 钟登华, 张宗亮, 等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 20-27. (MA Hongqi, ZHONG Denghua, ZHANG Zongliang, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(12): 20-27. (in Chinese))
- [11] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 48(7): 1027-1034. (ZHONG Denghua, LIU Donghai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rock fill dam [J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 48(7): 1027-1034. (in Chinese))
- [12] 马洪琪. 糯扎渡水电站掺砾黏土心墙堆石坝质量控制关键技术[J]. 水力发电, 2012, 38(9): 12-15. (MA Hongqi. Key technologies on construction quality control of rock fill dam with core wall filled by clay soil mixed with gravel in Nuozhadu Hydropower Station Project [J]. Water Power, 2012, 38(9): 12-15. (in Chinese))
- [13] 张国新, 刘有志, 刘毅. “数字大坝”朝“智能大坝”的转变: 高坝温控防裂研究进展[C]//贾金生, 陈云华. 水库大坝建设与管理中的技术进展: 中国大坝协会 2012 学术年会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2012: 74-84.
- [14] 李庆斌. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 139-146. (LI Qingbin. Demonstration on intelligent dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 139-146. (in Chinese))
- [15] 张国新, 刘毅, 李松辉, 等. 混凝土坝温控防裂智能监控系统及其工程应用[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 96-102. (ZHANG Guoxin, LIU Yi, LI Songhui, et al. Intelligent monitoring and control system for temperature control and crack prevention of concrete dam and its engineering application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(1): 96-102. (in Chinese))
- [16] 谭恺炎, 陈军琪, 燕乔, 等. 大体积混凝土冷却通水数据自动化采集系统研制及应用[C]//贾金生. 水库大坝建设与管理中的技术进展: 中国大坝协会 2012 学术年会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2012: 502-507.
- [17] 张国新. SPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用[J], 水利水电技术, 2013, 44(1): 31-44. (ZHANG Guoxin. Development and application of SPTIS: a software of multi-field simulation and nonlinear analysis of complex structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 31-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-06-24 编辑: 骆超)

(上接第 67 页)

- [68] 左军成, 徐珊珊, 石少华, 等. 东中国海环流对 2008 年浒苔事件的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 561-568. (ZUO Juncheng, XU Shanshan, SHI Shaohua, et al. Impact of East China Sea current on algal bloom in 2008 [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(5): 561-568. (in Chinese))
- [69] 朱建荣, 肖成猷, 沈焕庭. 夏季长江冲淡水扩展的数值模拟[J]. 海洋学报, 1998, 20(5): 13-22. (ZHU Jianrong, XIAO Chengyou, SHEN Huanting. Numerical model simulation of expansion of Changjiang diluted water in summer [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(5): 13-22. (in Chinese))
- [70] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 183-206. (MAO Hanli, GAN Zijun, LAN Shufang. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing progress [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1963, 5(3): 183-206. (in Chinese))
- [71] 赵保仁. 长江冲淡水的转向机制问题[J]. 海洋学报, 1991, 13(5): 600-610. (ZHAO Baoren. Diversion mechanism of Yangtze diluted water [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1991, 13(5): 600-610. (in Chinese))
- [72] WU Hui, SHEN Jian, ZHU Jianrong, et al. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast [J]. Continental Shelf Research, 2014, 76: 108-123.

(收稿日期: 2015-06-30 编辑: 彭桃英)